



TITLE:

電子バーンスタイン波による電子加熱と電流駆動

AUTHOR(S):

長崎, 百伸

CITATION:

長崎, 百伸. 電子バーンスタイン波による電子加熱と電流駆動. 2005

ISSUE DATE:

2005-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/82005>

RIGHT:

p.27-97は学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

電子バーンスタイン波による 電子加熱と電流駆動

(課題番号 14580517)

平成 14 年度－平成 16 年度科学研究費補助金

(基盤研究 (C) (2))

研究成果報告書



平成 17 年 3 月

研究代表者 長崎百伸

京都大学エネルギー理工学研究所

研
4

電子バーンスタイン波による 電子加熱と電流駆動

(課題番号 14580517)

平成 14 年度－平成 16 年度科学研究費補助金

(基盤研究 (C) (2))

研究成果報告書

平成 17 年 3 月

研究代表者 長崎百伸

京都大学エネルギー理工学研究所

研究組織

研究代表者 長崎百伸（京都大学エネルギー理工学研究所・助教授）
 研究分担者 吉川 潔（京都大学エネルギー理工学研究所・教授）
 研究分担者 増田 開（京都大学エネルギー理工学研究所・助教授）
 研究分担者 佐野史道（京都大学エネルギー理工学研究所・教授）
 研究分担者 水内 亨（京都大学エネルギー理工学研究所・教授）
 研究分担者 花谷 清（京都大学エネルギー理工学研究所・助教授）
 研究分担者 岡田浩之（京都大学エネルギー理工学研究所・助手）
 研究分担者 近藤克己（京都大学エネルギー理工学研究所・教授）
 研究分担者 前川 孝（京都大学エネルギー理工学研究所・教授）
 研究分担者 中村祐司（京都大学エネルギー理工学研究所・助教授）
 研究分担者 別生 栄（京都大学エネルギー理工学研究所・助手）

交付決定額(配分額)

(金額単位:千円)

	直接経費	間接経費	合 計
平成 14 年度	900	0	900
平成 15 年度	1,100	0	1,100
平成 16 年度	800	0	800
総 計	2,800	0	2,800

発表論文

1. K. Nagasaki, N. Yanagi, "Electron Bernstein Wave Heating in Heliotron Configurations" Plasma Physics and Controlled Fusion 44 (2002) 409-422
2. 近藤克己、水内亨、長崎百伸、岡田浩之、佐野史道、別生栄、設楽浩之、真鍋義人、洪遠齡、川染勇人、高宮太承、武田全史、津留寛樹、富山圭史、前野正吾、大野宣則、西岡佑亮、行本瑛俊、入口雅夫、久保浩康、井尻芳行、千住徹、矢口啓二、坂本欣三、東使潔、芝野匡志、山岸統、鈴木康浩、中須賀正彦、花谷清、中村祐司、若谷誠宏、大引得弘、"ヘリオトロンJにおけるECH実験"、プラズマ・核融合学会誌 78 (2002) 1231-1238
3. V. Tribaldos, H. Shidara, K. Nagasaki, Y. Nakamura, K. Sakamoto, H. Yukimoto, M. Nakasuga, F. Sano, T. Obiki, "Ray Tracing Calculation of ECRH Power Absorption for Heliotron J", J. Plasma Fusion Res. 78 (2002) 996-997
4. T. Obiki, F. Sano, K. Kondo, M. Wakatani, T. Mizuuchi, K. Hanatani, Y. Nakamura, K. Nagasaki, H. Okada, S. Besshou, M. Nakasuga, H. TGSuru, Y. Manabe, H. Shidara, W. L. Ang, T. Takamiya, M. Iriguchi, M. Takeda, H. Kawazome, S. Maeno, K. Tomiyama, Y. Ohno, H. Kubo, Y. Nishioka, H. Yukimoto, Y. Ijiri, T. Senju, K. Yaguchi, K. Sakamoto, K. Toshi, M. Shibano, F. Tabares, V. Tribaldos, "Recent Experiments in Heliotron J", J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 5 (2002) 288-291
5. H. Shidara, K. Nagasaki, K. Sakamoto, H. Yukimoto, M. Nakasuga, F. Sano, K. Kondo, T. Mizuuchi, H. Okada, S. Besshou, Y. Manabe, W. L. Ang, H. Kawazome, S. Maeno, M. Takeda, T. Takamiyaz, K. Tomiyama, H. Tsuru, Y. Ohno, H. Kubo, Y. Nishioka, M. Iriguchi, V. Orlov, A. Pavelyev, A. Tolkachev, V. Tribaldos and T. Obiki, "70GHz Electron Cyclotron Resonance Heating System for Heliotron J", J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 5 (2002) 333-336
6. K. Nagasaki, A. Isayama, S. Ide and JT-60 team, "Stabilization effect of early ECCD on a neoclassical tearing mode in the JT-60U tokamak", Nucl. Fusion 43 (2003) L7-L10
7. A. Isayama, Y. Kamada, N. Hayashi, T. Suzuki, T. Oikawa, T. Fujita, T. Fukuda, S. Ide, H. Takenaga, K. Ushigusa, T. Ozeki, Y. Ikeda, N. Umeda, H. Yamada, M. Isobe, Y. Narushima, K. Ikeda, S. Sakakibara, K. Yamazaki, K. Nagasaki and the JT-60 Team, "Achievement of high fusion triple product, steady-state sustainment and real-time NTM stabilization in high- β_p ELMY H-mode discharges in JT-60U", Nucl. Fusion 43 (2003) 1272-1278
8. H Zohm, G Gantenbein, A Isayama, A Keller, R J La Haye, M Maraschek, A Mück, K Nagasaki, S D Pinches and E J Strait, "MHD limits to tokamak operation and their control", Plasma Phys. Control. Fusion 45 (2003) A163-A173
9. SANO Fumimichi, MIZUUCHI Tohru, NAGASAKI Kazunobu, OKADA Hiroyuki, KOBAYASHI Shinji, KONDO Katsumi, HANATANI Kiyoshi, NAKAMURA Yuji,

- NAKASUGA Masahiko, BESSHOU Sakae, YAMAMOTO Satoshi, SUZUKI Yasuhiro, MANABE Yoshito, SHIDARA Hiroyuki1), TAKAMIYA Tasho, OHNO Yoshinori, NISHIOKA Yusuke1), YUKIMOTO Hidetoshi, TAKAHASHI Kohichi, FUKAGAWA Youhei, KAWAZOME Hayato, KANEKO Masashi, TSubOI Shintarou, NAKAZAWA Shingo, NISHIO Shigeru, YAMADA Masaki1), IJIRI Yoshiyuki, SENJU Tohru, YAGUCHI Keiji, SAKAMOTO Kinzou, TOHSHI Kiyoshi, SHIBANO Masashi, TRIBALDOS Victor, TABARES Francisco, OBIKI Tokuhiko, "Recent H-mode Results on ECH plasmas in Heliotron J" *Journal of Plasma and Fusion Research* 79 (2003) 1111-1112
10. T. Obiki, T. Mizuuchi, H. Okada, K. Nagasaki, F. Sano, S. Kobayashi, K. Hanatani, Y. Ijiri, T. Senju, K. Yaguchi, K. Sakamoto, K. Tohshi, M. Shibano, K. Kondo, M. Nakasuga, Y. Nakamura, M. Wakatani, S. Besshou, Y. Manabe, H. Shidara, W. L. Ang, H. Kawazome, S. Maeno, M. Takeda, K. Tomiyama, H. Tsuru, M. Iriguchi, S. Kaneko, H. Kubo, Y. Nishioka, Y. Ohno, T. Takamiya, H. Yukimoto, Y. Fukagawa, S. Nakazawa, Y. Morita, S. Nishio, K. Takahashi, S. Tsuboi, M. Yamada, N. Nishino, V. Tribaldos and F. Tabares, "Confinement characteristics of ECH plasmas in Heliotron J", *Nucl. Fusion* 44 (2004) 47-55
 11. Hiroyuki Shidara, Kazunobu Nagasaki, Kinzo Sakamoto, Hidetoshi Yukimoto, Masahiko Nakasuga, Fumimichi Sano, Katsumi Kondo, Tohru Mizuuchi, Hiroyuki Okada, Sakae Besshou, Shinji Kobayashi, Yoshito Manabe, Hayato Kawazome, Tasho Takamiya, Yoshinori Ohno, Hiroyasu Kubo, Yusuke Nishioka, Masao Iriguchi, Masashi Kaneko, Koichi Takahashi, Yohei Fukagawa, Yuya Morita, Masaki Yamada, Shingo Nakazawa, Shintaro Tsuboi, Shigeru Nishio, Victor Orlov, Alexander Pavelyev, Alexander Tolkachev, Victor Tribaldos, Tokuhiko Obiki, "A 70-GHz Electron Cyclotron Resonance Heating System for Heliotron J", *Fusion Science and Technology*, Volume 45 No.1 (2004) 41-48
 12. H. Shidara, K. Nagasaki, V. Tribaldos, Y. Nakamura, K. Sakamoto, M. Nakasuga, F. Sano, K. Kondo, T. Mizuuchi, H. Okada, S. Kobayashi and T. Obiki, "Ray Tracing Calculation of ECRH Power Absorption Profile in Heliotron J", *J. Plasma Fusion Res.*, 81 (2005) 48-56
 13. K. Nagasaki, K. Takahashi, T. Mizuuchi, N. Nishino, Y. Nishioka, H. Shidara, K. Hanatani, H. Okada, S. Kobayashi, S. Yamamoto, K. Kondo, Y. Nakamura, H. Kawazome, M. Kaneko, Y. Fukagawa, T. Obiki and F. Sano, "Experimental study of plasma breakdown by second harmonic electron cyclotron waves in Heliotron J", *Nucl. Fusion* 45 (2005) 13-21

研究発表

1. K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, F. Sano, K. Kondo, S. Besshou, M. Nakasuga, Y. Manabe, H. Shidara, K. Aizawa, W. L. Ang, Y. Ikeda, H. Kawazome, T. Kobayashi, S. Maeno, T. Takamiya, M. Takeda, T. Tomiyama, M. Iriguchi, Y. Ohno, H. Kubo, Y. Nishioka, V. Tribaldos, V. Orlov, A. Pavelyev, A. Tolkachev, and T. Obiki, "Plasma Production and Non-Electromagnetic Resonant ECH in Heliotron J", Proc. 13th International Stellarator Workshop, Canberra, Australia, February 25- March 1, 2002, PI:21
2. K. Nagasaki, N. Yanagi, H. Shidara, F. Sano, K. Kondo, T. Mizuuchi, H. Okada, M. Nakasuga, S. Besshou, Y. Manabe, W. L. Ang, H. Kawazome, S. Maeno, K. Tomiyama, H. Tsuru, T. Takamiya, M. Takeda, T. Obiki, "Electron Bernstein Wave Heating in Heliotron Systems", Proc. 12th International Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Aix-en-Provence, France, May 13-16, 2002, p.317-320
3. T. Obiki, H. Okada, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, F. Sano, K. Kondo, M. Wakatani, K. Hanatani, Y. Nakamura, S. Besshou, M. Nakasuga, Y. Manabe, H. Shidara, W. L. Ang, H. Kawazome, S. Maeno, T. Takamiya, M. Takeda, K. Tomiyama, H. Tsuru, M. Iriguchi, H. Kubo, Y. Nishioka, Y. Ohno, H. Yukimoto, Y. Ijiri, T. Senju, K. Yaguchi, K. Sakamoto, K. Tohshi, M. Shibano, V. Tribaldos, F. Tabarés, "Overview of Recent Experiments in Heliotron J", Proc. 13th International Stellarator Workshop, Canberra, Australia, February 25- March 1, 2002, OI:8
4. H. Punzmann, M. Shats, K. Nagasaki and H. Smith, "28 GHz ECH System for H-1", Proc. 13th International Stellarator Workshop, Canberra, Australia, February 25- March 1, 2002, PI:20
5. T. Obiki, T. Mizuuchi, H. Okada, K. Nagasaki, F. Sano, K. Kondo, S. Kobayashi, M. Nakasuga, K. Hanatani, Y. Nakamura, M. Wakatani, S. Besshou, Y. Ijiri, T. Senju, K. Yaguchi, K. Sakamoto, K. Tohshi, M. Shibano, Y. Manabe, H. Shidara, W. L. Ang, H. Kawazome, S. Maeno, M. Takeda, K. Tomiyama, H. Tsuru, M. Iriguchi, M. Kaneko, H. Kubo, Y. Nishioka, Y. Ohno, T. Takamiya, H. Yukimoto, Y. Fukagawa, S. Nishio, K. Takahashi, S. Tsuboi, M. Yamada, N. Nishino, V. Tribaldos, F. Tabarés, "Confinement Characteristics of ECH Plasmas in Heliotron J", 19th IAEA Fusion Energy Conference, Lyon, France, October 14-19, 2002, IAEA-CN-94/EX/P3-02
6. A. Isayama, Y. Kamada, N. Hayashi, T. Suzuki, T. Oikawa, T. Fujita, T. Fukuda, S. Ide, H. Takenaga, K. Ushigusa, T. Ozeki, Y. Ikeda, N. Umeda, H. Yamada, M. Isobe, Y. Narushima, K. Ikeda, S. Sakakibara, K. Yamazaki, K. Nagasaki and the JT-60 Team, "Achievement of a High Fusion Triple Product and Steady State Sustainment in High β_p ELMY H-mode Discharges in JT-60U", 19th IAEA Fusion Energy Conference, Lyon, France, October 14-19, 2002, IAEA-CN-94/EX/C2-2

7. K. Nagasaki, N. Yanagi, H. Teraoka, T. Mizuuchi, H. Okada, F. Sano, K. Kondo, S. Besshou, M. Nakasuga, Y. Manabe, H. Shidara, W. L. Ang, Y. Kawazome, S. Maeno, T. Takamiya, M. Takeda, K. Tomiyama, H. Tsuru, T. Obiki, "Electron Bernstein Wave Heating in Spherical Torus and Helical System", US-Japan Workshop on "RF Physics" and "Profile Control and Steady State Operation using RF", Feb. 2, 2002-Feb. 5, 2002, Kyushu University
8. 長崎百伸、柳長門、水内亨、岡田浩之、佐野史道、近藤克己、別生栄、中須賀正彦、真鍋義人、設楽弘之、洪遠齡、川染勇人、前野正吾、高宮太承、武田全史、富山圭史、津留寛樹、大引得弘、"ヘリオトロン配位における電子バーンスタイン波加熱" 核融合科学研究所共同研究「ヘリカル型装置の閉じ込め改善に関する研究」「先進ヘリカル磁場配位の研究」合同研究会、2002年3月5-6日、核融合科学研究所
9. 長崎百伸、他、"ヘリカル系における電子サイクロトロン波によるプラズマ生成" 第15回 TRIAM 研究会、2002年3月14日、九州大学応用力学研究所
10. 長崎百伸、柳長門、"ヘリオトロン配位における電子バーンスタイン波加熱"、日本物理学会第57回年次大会 2002年3月24日-27日、25aXE8
11. 長崎百伸、"任意グループ形状偏波器の開発"、平成14年度核融合科学研究所共同研究作業会「ミリ波プラズマ応用技術」、2002年7月30日、核融合科学研究所
12. 長崎百伸、水内亨、高橋功一、西野信博、設楽弘之、佐野史道、近藤克己、岡田浩之、小林進二、中須賀正彦、真鍋義人、川染勇人、高宮太承、入口雅夫、大野宜則、金子昌司、久保浩康、西岡佑亮、行本瑛俊、坪井伸太郎、西尾茂、深川陽平、山田雅毅、大引得弘、「ヘリオトロンJにおけるECHプラズマ生成」、第19回プラズマ・核融合学会年会、2002年11月26日-29日、犬山市犬山国際観光センター「フロイデ」、26aA02P
13. K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, F. Sano, K. Kondo, S. Kobayashi, et al., "Recent Plasma Experimental Results on Heliotron J", Dec. 9, 2002, CIEMAT, Spain
14. H. Shidara, K. Nagasaki, K. Sakamoto, H. Yukimoto, M. Nakasuga, F. Sano, K. Kondo, T. Mizuuchi, H. Okada, S. Besshou, Y. Manabe, A. W. Leng, H. Kawazome, S. Maeno, M. Takeda, T. Takamiya, K. Tomiyama, Y. Ohno, H. Kubo, Y. Nishioka, M. Iriguchi, H. Tsuru, V. Orlov, A. Tolkachev, A. Pavelyev, V. Tribaldos and T. Obiki "70 GHz Electron Cyclotron Resonance Heating System for Heliotron J" Joint Meeting of US-Japan RF Heating Technology Workshop and EU-Japan RF Antenna and the Related Technology Workshop, 28 Feb. - 2 March, 2002, Inuyama, Japan
15. 岡田浩之、水内亨、長崎百伸、他、"ヘリオトロンJ実験概要" 核融合科学研究所共同研究「ヘリカル型装置の閉じ込め改善に関する研究」「先進ヘリカル磁場配位の研究」合同研究会、2002年3月5-6日、核融合科学研究所
16. 設楽弘之、長崎百伸、他、"ヘリオトロンJにおける70GHzECHシステム" 核融合科学研究所共同研究「ヘリカル型装置の閉じ込め改善に関する研究」「先進ヘリカル磁場配位の研究」合同研究会、2002年3月5-6日、核融合科学研究所

17. 水内亨、岡田浩之、長崎百伸、佐野史道、近藤克己、真鍋義人、設楽弘之、洪遠齡、川染勇人、前野正吾、高宮太承、武田全史、富山圭史、津留寛樹、入口雅夫、久保浩康、西岡祐亮、行本英俊、高橋功一、山田雅毅、西尾茂、西野信博、大引得弘、「ヘリオトロンJ装置におけるECHプラズマ実験」第4回核融合エネルギー連合講演会、2002年6月13-14日、大阪大学コンベンションセンター、A036
18. 高宮太承、行本英俊、長崎百伸、水内亨、近藤克己、佐野史道、岡田浩之、別生栄、真鍋義人、大引得弘、設楽弘之、洪遠齡、川染勇人、津留寛樹、富山圭史、前野正吾、西岡祐亮、大野宜則、入口雅夫、久保浩康、金子昌司、「ヘリオトロンJにおけるマルチチャンネルラジオメータを用いた電子サイクロトロン波計測」第4回核融合エネルギー連合講演会、2002年6月13-14日、大阪大学コンベンションセンター、A041
19. 設楽弘之、長崎百伸、V. Tribaldos, 坂本欣三、行本英俊、V. Orlov, A. Tolkachev, A. Pavelyev, 大引得弘、「ヘリオトロンJにおける70GHzECHパワーの吸収分布計算」第4回核融合エネルギー連合講演会、2002年6月13-14日、大阪大学コンベンションセンター、C088
20. 水内亨他、「ヘリオトロンJ装置におけるECHプラズマ閉じ込め特性」、第19回プラズマ・核融合学会年会、2002年11月26日-29日、犬山市犬山国際観光センター「フロイデ」、26aA01P
21. 行本英俊他、「ヘリオトロンJにおけるマルチチャンネルラジオメータを用いた電子温度計測」、第19回プラズマ・核融合学会年会、2002年11月26日-29日、犬山市犬山国際観光センター「フロイデ」、26aA04P
22. K. Nagasaki, T. Mizuuchi, K. Takahashi, Y. Nishioka, N. Nishino, K. Kondo, Y. Nakamura, H. Okada, S. Kobayashi, S. Yamamoto, Y. Manabe¹, H. Shidara, Y. Ohno, T. Takamiya, H. Yukimoto, Y. Fukagawa, H. Kawazome, M. Kaneko, M. Iriguchi, H. Kubo, S. Nakazawa, S. Nishio, S. Tsuboi, M. Yamada, T. Obiki, F. Sano, "Plasma Breakdown by Second Harmonic Electron Cyclotron Waves in Heliotron J", 14th International Stellarator Workshop, September 22 - 26, 2003, Greifswald, Germany, P.Tu10
23. K. Nagasaki, H. Shidara, K. Sakamoto, K. Yoshikawa, F. Sano, T. Mizuuchi, H. Okada, M. Masuda, S. Kobayashi, K. Kondo, S. Kobayashi, S. Kubo, V. Orlov, A. Pavelyev, A. Tolkachev, "70GHz ECH/ECCD System for Heliotron J Plasma Device", Conference Digest of the 28th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, Sep. 29-Oct. 2, 2003, Piazza Ohmi, Otsu, Shiga, Japan, Th5-5
24. A. Isayama, K. Nagasaki, S. Ide, T. Fukuda, T. Suzuki, M. Seki, S. Moriyama, Y. Ikeda and JT-60 team, "Stabilization of Neoclassical Tearing Mode by Electron Cyclotron Wave Injection in JT-60U", 15th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, May 19-21, 2003, Grand Teton National Park, Moran, Wyoming, USA
25. F. Sano, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, H. Okada, S. Kobayashi, K. Kondo, K. Hanatani, Y. Nakamura, M. Nakasuga, S. Besshou, S. Yamamoto, Y. Suzuki, Y. Manabe, H. Shidara, T.

- Takamiya, Y. Ohno, Y. Nishioka, H. Yukimoto, K. Takahashi, Y. Fukagawa, H. Kawazome, M. Kaneko, S. Tsuboi, S. Nakazawa, S. Nishio, M. Yamada, Y. Ijiri, T. Senju, K. Yaguchi, K. Sakamoto, K. Tohshi, M. Shibano, V. Tribaldos, F. Tabares, T. Obiki, "Recent Results from Heliotron J", 14th International Stellarator Workshop, September 22 - 26, 2003, Greifswald, Germany, I.Tu1
26. T. MIZUUCHI, H. OKADA, S. KOBAYASHI, K. NAGASAKI, F. SANO, K. KONDO, HANATANI, M. NAKASUGA, Y. NAKAMURA, S. YAMAMOTO, Y. SUZUKI, H. SHIDARA, H. KAWAZOME, M. KANEKO, Y. FUKAGAWA, Y. MORITA, S. NAKAZAWA, S. NISHIO, K. TAKAHASHI, S. TUBOI2, M. YAMADA, K. OHASHI, Y. IJIRI, T. SENJU, K. YAGUCHI, K. SAKAMOTO, K. TOHSHI, M. SHIBANO, and T. OBIKI, "Spontaneous Changes of the Confinement Observed in Heliotron J NBI Plasmas", 14th International Stellarator Workshop, September 22 - 26, 2003, Greifswald, Germany, O.Tu3
 27. 長崎百伸、諫山明彦、井手俊介、林伸彦、JT-60 チーム、「JT-60U における新古典ティアリリングモードに対する EC 早期入射の安定化効果」、日本物理学会第 58 回年次大会東北大学川内キャンパス、2003 年 3 月 28-31 日、31aYJ5
 28. K. Nagasaki, A. Isayama, S. Ide, N. Hayashi and JT-60 Team, "Stabilization of NTM by ECCD before Emergence of the Mode in JT-60", ITPA, July 2003
 29. 長崎百伸、佐藤元泰、「京都大学ヘリオトロン装置における電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システム」、日本におけるジャイロトロンの開発と核融合研究への応用、福井大学遠赤外領域開発研究センター、2003 年
 30. K. Nagasaki, W. Namkung, H. Shidara, K. Sakamoto, F. Sano, T. Mizuuchi, H. Okada, S. Kobayashi, K. Kondo, Y. S. Bae, M. H. Cho, A. England, "Electron Cyclotron Heating and Current Drive System for Fusion Devices", CUP Midterm Evaluation Symposium towards Progress in Energy Science and Technology, Seoul National University, July 18-19, 2003
 31. 長崎百伸、吉村泰夫、設楽弘之、岡田浩之、佐野史道、水内亨、小林進二、山本聡、近藤克己、川染勇人、金子昌司、松岡啓介、居田克己、磯部光孝、吉沼幹朗、永岡賢一、岡村昇一、鈴木千尋、秋山毅志、南貴司、東井和夫、清水昭博、高橋千尋、松下啓行,"CHS における電子サイクロトロン電流駆動実験"、プラズマ・核融合学会第 20 回年会、2003 年 11 月 25 日-11 月 28 日、茨城県立県民文化センター、水戸市、25aA37P
 32. 設楽 弘之、長崎 百伸、坂本 欣三、TRIBALDOS Victor、行本 瑛俊、中須賀 正彦、近藤 克己、水内 亨、岡田 浩之、小林 進二、川染 勇人、金子 昌司、高橋 功一、深川 陽平、坪井 伸太郎、中沢 真吾、西尾 茂、山田 雅毅、森田 悠哉、竹本 崇、ORLOV Victor、TOLKACHEV Alexander、PAVELYEV Alexander、大引 得弘、佐野 史道、「Heliotron J における 70 GHz ECRH システムの改良」、プラズマ・核融合学会第 20 回年会、2003 年 11 月 25 日-11 月 28 日、茨城県立県民文化センター、水戸市、27pA20P
 33. 林伸彦、諫山明彦、長崎百伸、小関隆久、「電子サイクロトロン波駆動電流による新古典

- 手廻リングモード安定化の数値計算」、プラズマ・核融合学会第 20 回年会、2003 年 11 月 25 日-11 月 28 日、茨城県立県民文化センター、水戸市、25pA02
34. K. Nagasaki, A. Isayama, N. Hayashi, N. Oyama, M. Takechi, S. Ide, JT-60 Team, "Effect of ECCD at the Onset of Neoclassical Tearing Mode in JT-60U", US-Japan Workshop on Applications of RF Physics for Plasma Heating and Current Drive, July 14-16, 2004, Tsukuba University
 35. Kazunobu Nagasaki, Hiroyuki Shidara, Kinzo Sakamoto, Katsumi Kondo, Tohru Mizuuchi, Hiroyuki Okada, Shinji Kobayashi, Shin Kubo, Sakuji Kobayashi and Fumimichi Sano, "Development of 70GHz High Power Microwave System for Electron Cyclotron Heating and Current Drive on Heliotron J Fusion Plasma Device", International Symposium on Microwave Science and Its Application to Related Fields, P7-01, July 27-30, 2004, Sunport Hall Takamatsu and Kagawa International Conference Hall, Takamatsu
 36. K. Nagasaki, A. Isayama, N. Hayashi, T. Ozeki, M. Takechi, N. Oyama, S. Ide, S. Yamamoto and JT-60 Team, "Stabilization of Neoclassical Tearing Mode by Electron Cyclotron Current Drive and Its Evolution Simulation on JT-60U Tokamak", 20th IAEA Fusion Energy Conference 2004, Vilamoura Portugal, 1 - 6 Nov. 2004, EX/7-4
 37. K. Nagasaki, H. Shidara, K. Sakamoto, N. Shimazaki, T. Tsuji, T. Mizuuchi, H. Okada, S. Kobayashi, K. Hanatani, K. Kondo, Y. Nakamura and F. Sano, "70 GHz High Power Millimeter Wave System for Electron Cyclotron Heating and Current Drive on Heliotron J Fusion Plasma Device", The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE)", 1-3 December 2004, Hua Hin, Thailand, 1-032 (P)
 38. K. Nagasaki, et al., "Recent Progress on Heliotron J Experiment", Korea-Japan Seminar, Aug. 2-3, 2004, IAE, Kyoto University,
 39. 長崎百伸, 諫山明彦, 林伸彦, 武智学, 大山直幸, 小関隆久, 井手俊介, JT60 チーム, 「JT-60U における早期 EC 入射による新古典ティアリングモードの安定化」、第 21 回プラズマ・核融合学会、2004 年 11 月 23 日-26 日、静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」、24A03P
 40. 吉村泰夫, 秋山毅志, 磯部光孝, 清水昭博, 鈴木千尋, 高橋千尋, 永岡賢一, 西村伸, 南貴司, 岡村昇一, 松岡啓介, 久保伸, 下妻隆, 野竹孝志, 大久保邦三, 長崎百伸, 設楽弘之, 「CHS における電子サイクロトロン波駆動電流の特性」、日本物理学会 2004 年秋季大会、2004 年 9 月 12-15 日、青森大学、青森市、14aXB7
 41. 長崎百伸, 諫山明彦, 林伸彦, 武智学, 大山直幸, 小関隆久, 井手俊介, JT-60 チーム, 「JT-60U における新古典ティアリングモードの安定化研究」、MHD 平衡及び安定性-MHD, 高エネルギー粒子サブクラスター的话题を中心として-研究会、2004 年 12 月 14 日、核融合科学研究所
 42. 水内亨, 佐野史道, 近藤克己, 長崎百伸, 小林進二, 花谷清, 中村祐司, 山本聡, 鳥居

祐樹、設楽弘之、川染隼人、有本元、東貴久、大橋佳祐、濱上崇史、本島巖、山崎久路、井尻芳行、千住徹、矢口啓二、東使潔、芝野匡志、西野信博、「ヘリオトロン J における自発的閉じ込め遷移現象」、第 21 回プラズマ・核融合学会、2004 年 11 月 23 日-26 日、静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」、23aA01

43. 嶋崎伸秀,長崎百伸,山本聡,設楽弘之,坂本欣三,水内亨,小林進二,近藤克己,佐野史道,岡出浩之,鳥居祐樹,金子 H 司,山用雅毅,大橋佳祐,濱上崇史,東貴久,山崎久路,菊竹正晃,本島巖,荒川純、「ヘリオトロン J における透過・反射計測を用いた EC 波の伝播・吸収解析」、第 21 回プラズマ・核融合学会、2004 年 11 月 23 日-26 日、静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」、25A32P
44. 伊神弘恵,野竹隆志,稲垣滋,吉村泰夫,下妻隆,久保伸,東井和夫,大久保邦三,長崎百伸、「LHD における電子バーンシュタイン波加熱の検討」、第 21 回プラズマ・核融合学会、2004 年 11 月 23 日-26 日、静岡県コンベンションアーツセンター「グランシップ」、26A05P
45. K. Nagasaki, et al., “Recent Experimental Results on Heliotron J and Proposal of Collaborative Research”, CIEMAT, Spain, March 15, 2005
46. 長崎百伸、嶋崎伸秀、辻貴之、水内亨、岡田浩之、小林進二、近藤克己、坂本欣三、佐野史道、“ヘリオトロン J における高パワー電子サイクロトロン波の透過・反射計測”、日本物理学会第 60 回年次大会、東京理科大、2005 年 3 月 24 日-27 日、24aXB5

概要

電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECRH) は、磁場閉じ込め核融合プラズマからプロセスプラズマに至る広範囲なプラズマパラメタ領域において多岐にわたる目的に用いられている。通常、伝搬モードは正常波 (O-mode)・異常波 (X-mode) といった電磁波が用いられるが、電磁波にはカットオフと呼ばれる密度上限があり、高電子密度領域ではプラズマ中を伝搬することができない。高密度プラズマを生成・加熱し、その特性を調べるためにはカットオフ密度に依らず加熱・制御できる手法の開発が望まれている。電子サイクロトロン周波数帯域において電子密度に関係なくプラズマ中を伝搬できる波として電子バーンシュタイン波 (EBW) があり、カットオフ密度が存在しない、低電子温度 ($\sim 10\text{eV}$) においても吸収係数が高いという長所を有する。近年、アンテナ技術や理論計算の発展により EBW にモード変換するための伝搬角度の同定が可能となり、EBW の利用が現実的なものになってきた。

本研究では、トーラス配位における EBW 加熱の可能性について検討するため、レイトレーシング計算コードを開発しパワー吸収分布について調べた。O-X-B 加熱では O-X モード変換効率を向上させるために入射角と偏波面を注意深く制御する必要がある。計算結果はパワー吸収分布のプラズマパラメタ依存性が弱いことを示し、実験において O-X-B 加熱を実証するのは好都合である。ヘリカル系では、遅波 X-B モード変換加熱は、その磁場形状から入射角をトロイダル方向に傾けることによって弱磁場側ポートからの入射によって可能である。球状トーラスでは、プラズマ誘電率が高いため通常の電磁波を用いた ECH の利用は困難であり、EBW による加熱・電流駆動が重要な役割を果たすことになる。ヘリカル系と同様、O-X-B 加熱は可能であり、プラズマパラメタ、磁場に対する依存性を得た。

プラズマ実験では、ヘリオトロン J や LHD において X-B モード変換による加熱が観測された。ヘリオトロン J での実験では、コアプラズマ領域に電磁波共鳴層が存在しない条件においても第 2 高調波 X-mode 加熱と同様の蓄積エネルギー 1kJ を超えるプラズマを維持することができている。LHD ではトロイダル角方向に斜め入射することにより、X-B モード変換による EBW 加熱を示唆するデータが得られた。FFT 解析では、ECR 層から低磁場側でピークした狭いパワー吸収分布が得られている。

1. 研究目的

電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECRH) は、1keV を越える磁場閉じ込め核融合プラズマから数 eV 程度のプロセスプラズマに至る広範囲なプラズマパラメタ領域において、プラズマ生成、電子の加熱・電流駆動 (ECCD)、MHD 不安定性の抑制、熱・粒子輸送解析等多岐にわたる目的に用いられている。近年、トカマク装置ではベータ値の上限を決定する新古典ティアリングモードの安定化が重要課題の一つとなっており、ASDEX-U、DIII-D、JT-60 等、世界の装置で ECCD による安定化実験が成果を挙げている[1-3]。通常、伝搬モードは正常波 (O-mode)・異常波 (X-mode) といった電磁波が用いられるが、電磁波にはカットオフと呼ばれる密度上限が存在し、プラズマの電子密度がカットオフ密度よりも高くなる場合にはプラズマ中を伝搬することができない。高密度プラズマを生成・加熱し、また、その特性を調べるためにはカットオフ密度に依らず加熱・制御できる手法の開発が望まれている。電子サイクロトロン周波数帯域において電子密度に関係なくプラズマ中を伝搬できる波として電子バーンシュタイン波 (EBW) があり、EBW はカットオフ密度が存在しない、低電子温度 ($\sim 10\text{eV}$) においても吸収係数が高いという長所を有する。EBW を用いた加熱は理論的解析がなされているものの、プラズマ外部から直接励起することができないため、実際の実験ではほとんど利用されてこなかった。近年、アンテナ技術や理論計算の発展により EBW にモード変換するための伝搬角度の同定が可能となり、EBW の利用が現実的なものになっている[4]。本研究の目的は、O-X-B や X-B といったモード変換を用いて EBW をプラズマ中に励起し、密度上限のないプラズマ加熱・電流駆動を実験的にを行い、EBW の伝搬および吸収について調べることである。モード変換を用いて EBW をプラズマ中に励起し、密度上限のないプラズマ加熱・電流駆動を実験的に試み、高密度での効果的な電子加熱と高い電流駆動効率を探索する。

2. 電子バーンシュタイン波加熱方法

EBW は正常波、異常波といった電磁波 (横波) と異なり静電波 (縦波) であり、電磁波に比べプラズマ密度の増加によるカットオフが存在しない。また吸収効率がよく 10 eV 程度の低温プラズマの加熱も可能である。しかし、EBW は直接励起できないためモード変換によって電磁波から変換する必要がある。変換には 3 種類、「O-X-B 変換」、「slow X-B 変換」と「fast X-B 変換」がある。

「O-X-B 変換」は低磁場側から O-mode をある最適入射角で入射し、プラズマカットオフ領域内で X-mode に変換され、高域混成共鳴領域まで伝播し、EBW に変換されプラズマ中心にあるサイクロトロン共鳴層まで伝播し吸収される。「slow X-B 変換」は高磁場から slow X-mode を入射し高域混成共鳴領域まで伝播し、EBW に変換され同様にサイクロトロン共鳴

層で吸収される。「fast X-B 変換」は低磁場から fast X-mode を入射し、エヴァネセント層が狭い場合、slow X-mode に変換された後、EBW に変換され同様にサイクロトロン共鳴層で吸収される。以上の EBW 加熱方法について現在までに、O-X-B 加熱理論のトカマク、ヘリカル系への適用がなされ、高密度プラズマの電子加熱から W7-AS 装置で初めて実験的に O-X-B 加熱の検証が行われた。X-EBW 変換は UHR 付近で行われるが、低温プラズマ ($T_e < 50$ eV) の場合、衝突の効果が大きくなり波が UHR 付近で吸収される可能性が考えられる。しかし、高温プラズマ ($T_e > 100$ eV) の場合、サイクロトロン減衰が支配的であるのでこの吸収は無視できる。

3. レイトレーシング計算

3.1 ヘリオトロン配位における O-X-B 加熱

EBW の伝播及びパワー吸収を計算するため、レイトレーシングコードの開発を進めた[5]。プラズマパラメタの非一様性が弱く、また、幾何光学近似が有効であると仮定すると、波の軌跡は以下の微分方程式を数値的に解くことによって得ることができる。

$$\frac{d\mathbf{r}}{d\sigma} = \frac{\partial D}{\partial \mathbf{k}}, \quad \frac{d\mathbf{k}}{d\sigma} = -\frac{\partial D}{\partial \mathbf{r}}, \quad \frac{dt}{d\sigma} = -\frac{\partial D}{\partial \omega}, \quad (1)$$

ここで $D(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{r})=0$ は波の局所的な分散関係であり、 $\mathbf{r}(\sigma)$, $\mathbf{k}(\sigma)$ and $t(\sigma)$ はそれぞれ波の軌跡に沿った位置、波数ベクトル、時間を表している。EBW を励起する前の電磁波の分散関係は冷たいプラズマ近似によって与えることができる。計算手法は H-1 ヘリアック装置のために開発されたレイトレーシングコードと同様である[6]。電磁波の吸収係数は誘電率テンソルにおいて弱相対論的效果を入れて求めることができる。一方、静電波である EBW の分散関係は熱いプラズマ近似を用いて求めることができる。

まず、モデル配位として大型ヘリカル装置 LHD を考える。図 3.1 は O-X-B 変換におけるレイ軌跡の例を示している。レイは水平ポートのトーラス外側から入射されている。入射角が O-X モード変換のための最適値になったとき、O-mode は X-mode となりカットオフ層を超えて高密度領域へ入ってゆく。その後、低密度側へ戻ってくる X-mode は高域混成共鳴層 (UHR) に到達すると、運動論的效果により X-mode は UHR において吸収されずに EBW へと変換される。生成された EBW は高密度領域へと伝播し、ドップラーシフトした共鳴条件が満たされる位置において波のエネルギーは電子の運動エネルギーへと変換される。

LHD, CHS のようなヘリカル配位では強い磁気シアアがあるため、ポロイダル磁場は小半径が変わるとともに大きく変化し、プラズマ周辺領域ではトロイダル磁場と同程度になる。

この磁場特性は O-X モード変換のためのミリ波入射条件や EBW のパワー吸収分布に影響を与える。O-X モード変換のための最適入射角はトロイダル角、ポロイダル角双方ともに調整しなければならない。例えば、図 3.1 の場合の最適入射角は、トロイダル角 20.7 度、ポロイダル角 13.0 度である。磁気シアーによって O-mode と X-mode が結合するため、偏波面もカットオフ層で O-mode となるように注意して調整する必要がある[7]。図 3.2 にパワー吸収分布を示すように、強くドップラーシフトしていることがわかる。 $N_{||}$ のアップシフトは磁場の非一様性から来る幾何的な効果である。この効果はトカマクよりもヘリカル系において強い。

3.2ヘリオトロン配位における X-B 加熱

ヘリカル系トーラスプラズマでは、その 3 次元磁場配位の特異性から、低磁場側からの入射により遅波 X-B 加熱が可能である。波があるトロイダル入射角で低磁場側真空容器ポートから入射されると、波は高磁場領域からプラズマへ入り、エヴァネセント層に当たることなく UHR 層にアクセスすることができる。この章では、slow X-B 加熱に関するレイトレーシング計算結果を示す。計算手法は 3.1 章と同じく、レイの軌跡は方程式 (1) を解き、EBW の分散式を解くことにより、吸収率を求める。レイは slow X-mode として出発する。X-mode は UHR に到達する前にサイクロトロン共鳴層を横切るため、サイクロトロン共鳴層での X-mode の吸収も考慮に入れている。

図 3.3 は X-B 加熱でのレイの軌跡の一例である。電子密度は UHR がプラズマ中心近傍に位置するように設定している。レイをトーラスの上側から出発させ、入射角はレイがプラズマ中心領域に到達するように調節してある。レイの軌跡は入射ポートのポロイダル断面に投影した。レイは高磁場側からプラズマに入り、その後 UHR に到達する。屈折効果は密度がカットオフ密度 $n_e^c = 1.75 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ よりも低いため弱い。この場合、X-mode が UHR に到達し EBW にモード変換された直後に強い波の吸収が起きる。サイクロトロン周波数は波の周波数に近く、 N_{\perp} の虚数は UHR 近傍で大きくなる。

サイクロトロン共鳴条件が満足されるとき、X-mode の吸収が生じる。これは、X-mode が UHR に到達する前に共鳴層を横切るときに発生する。パワー吸収率は、磁場と波数ベクトルのなす角、磁場強度やプラズマパラメタのような状況に依存する。 $B(0) < 2.9 \text{ T}$, $n_e < 3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合、最大吸収率は 30% であった。X-mode が吸収されるポロイダル断面は横長断面に近い。吸収位置はプラズマ周辺領域であるため、電子密度・温度は低く、X-mode の光学的厚さは低くなり、吸収率を低い値に抑えている。

EBW の吸収位置は磁場や電子密度に強く依存する。図 3.4 に X-B 加熱のためのアクセス可能ウィンドウを示す。レイはトーラス上側から入射している。X-B 加熱のウィンドウは O-X-B 加熱に比べかなり広い。例えば、 $B(0) = 2.7 \text{ T}$ ではトロイダル角度範囲 $\Delta\phi \sim 45 \text{ deg}$ 、ポロイダル角度範囲 $\Delta\theta \sim 20 \text{ deg}$ を得ている。パワー吸収位置は密度と入射角に依存するが、

中心領域を加熱することが可能である。磁場強度が下がるとウィンドウはサイクロトロン共鳴層の外側シフトにより狭くなる。最小磁場はこの配位では 2.0T であった。ウィンドウの外側では X-mode は右手カットオフにぶつかり、真空領域へと反射される。ウィンドウの内側では磁場と入射角を制御することにより中心加熱が可能である。密度が増加するとこのウィンドウの中に X-B 加熱の生じない穴が発生する。UHR 層は低磁場から高磁場側へと移動し、その結果、X-mode は EBW に変換されることなくプラズマから外へと出てゆくことになる。横断面からの水平入射でも入射ウィンドウは開くものの、その領域はトロイダル効果のため狭く、 $B(0) = 2.9 \text{ T}$ ではトロイダル角 $\Delta\phi \sim 10 \text{ deg}$ 、ポロイダル角 $\Delta\theta \sim 3 \text{ deg}$ である。

これらの計算結果から、LHD や CHS のようなヘリオトロン配位では、その 3 次元磁場構造から弱磁場側からのビーム入射でも slow X-B 加熱が可能であると結論できる。トロイダル角、ポロイダル角、両方向に斜め入射された X-mode は強磁場側から UHR にアクセスし、EBW にモード変換される。O-X 変換ポイントが狭い O-X-B 加熱に比べてアクセス可能ウィンドウがかなり広く、低・中密度領域のプラズマに適応することが可能である。LHD や CHS において、高密度を必要とする O-X-B 加熱に比べてかなり容易に EBW による加熱を実験的に実証することが可能であろう。

3.3 球状トーラス配位における O-X-B 加熱

3.3.1 モデル

球状トカマクは通常トカマクに比べトロイダル磁場が非常に低いため、ECRH 加熱に用いるサイクロトロン波周波数に限界がある。周波数が低いほどカットオフ密度も低く、通常の電磁波モードによる加熱が困難である。そのため球状トカマクでは EBW 加熱の研究が盛んに行われている。本章では、球状トカマク装置における EBW 加熱の可能性を調べる。球状トカマクは、通常トカマクに比べポロイダル磁場が強いためトロイダル磁場による近似が行えず、プラズマパラメタの変化を 3 次元で考え計算する。現存する球状トカマクの中からプリンストン大学の NSTX 装置を参考に、球状トカマクモデルを構築した[8]。また、EBW 加熱を達成するためには、ある最適入射角度でマイクロ波を入射する必要がある。EBW 加熱を行うための最適入射角の許容範囲、最適入射角のプラズマパラメタにおける依存性、EBW パワーがどのように吸収されるかの吸収分布を調べる。

3.3.2 数値計算結果

図 3.5 は中心電子密度の変化による O-X-B mode の軌道変化を表わしている。中心電子密度が高いほど早く EBW に変換され共鳴層方向へ伝播していることがわかる。電子密度が上が

るにつれて最適入射角度がプラズマ外側方向に向き、最適入射角度の変化が見られなくなる。中心電子密度の変化によって最適入射角度はポロイダル角度で 9 deg、トロイダル角度で 8 deg の差しかみられない。図 6.16 は中心電子密度とパワー密度の関係を表わしている。密度が高いほどプラズマ中心方向に吸収位置がシフトし、より局所的に吸収が起きていることがわかる。磁場依存性については、トロイダル磁場の増加により全体の磁場強度が強くなり基本波共鳴層が外にシフトされ、それにつれて吸収ポイントが外側にシフトする。中心トロイダル磁場が大きくなるにつれ、ドップラーシフトが小さくなる。

モデル構築において、入射周波数 28 GHz で第二高調波 O-mode によるサイクロトロン吸収が無視できるという仮定のもと、アスペクト比の小さいモデルを検討した。そのための必要条件是、高域混成共鳴領域が第二高調波共鳴層よりプラズマ内側に設定することである。周波数 28 GHz の場合、プラズマ中心密度をカットオフ密度以下にしないかぎり、必要条件を満たすことができないため、入射周波数を半分にしたモデルを構築した。この場合、温度が高いほど N_{\parallel} の値は相対的に小さく、 v_{\parallel} は大きくなる。温度によるドップラーシフトの差はそれほどなく、温度による依存度は小さい。このことは、波が吸収される位置（共鳴位置）を周波数または磁場を変化させることにより設定できる ECH に都合のよい結果であるといえる。プラズマパラメタ $B_t(0)$ 、 $n_e(0)$ 、 $T_e(0)$ の二つを固定し、一つを変化させて EBW の挙動を調べたところ、中心温度が低いほどプラズマ内部に伝播する。中心電子温度が高いほどドップラーシフトが大きく、吸収位置に広がりが見られた。また、中心密度の変化によりトロイダル方向よりもポロイダル方向に角度の変化が大きいため、密度の上昇とともに最適入射角度の変化が見られなくなる。密度が高いほどプラズマ内側で激しい吸収が起きる結果が得られた。密度とトロイダル磁場強度による変換効率の変化を計算したところ、中心密度の増加により変換効率に広がりが見られた。全体にトロイダル左方向よりもポロイダル上方向に移動する磁場の増加により変換効率の広がりさはさほど変化は見られないが、広がり方向が磁場の増加とともに反時計方向に変化する。

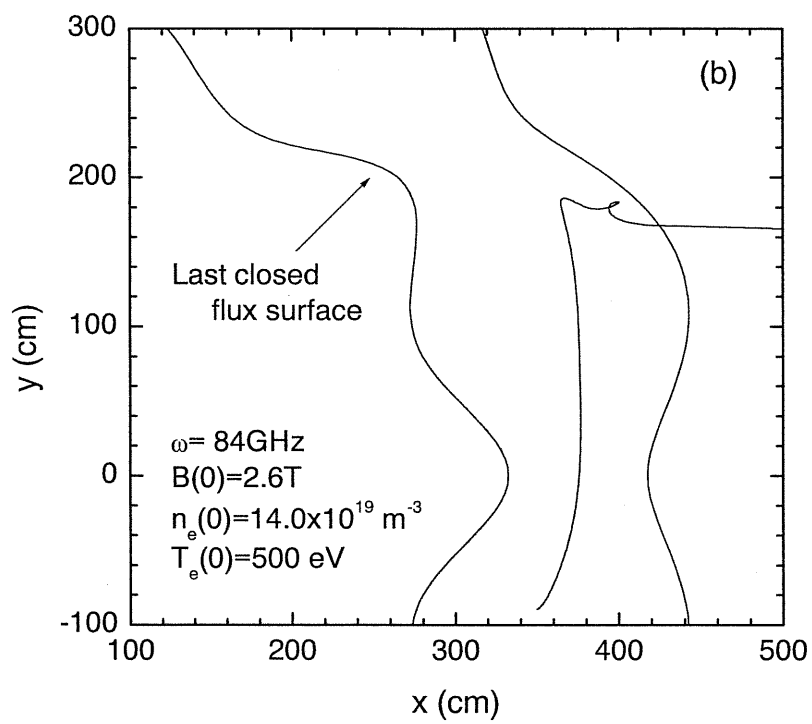
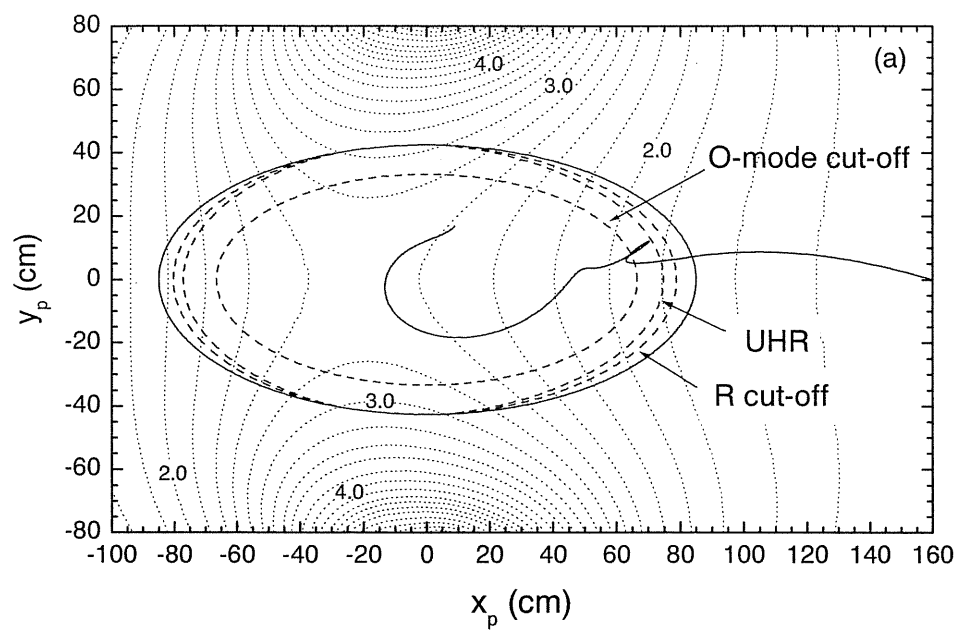


図 3.1 LHD 配位における 0-X-B モード変換によるレイの軌跡、(a) ポロイダル断面投影図、(b) トロイダル断面図

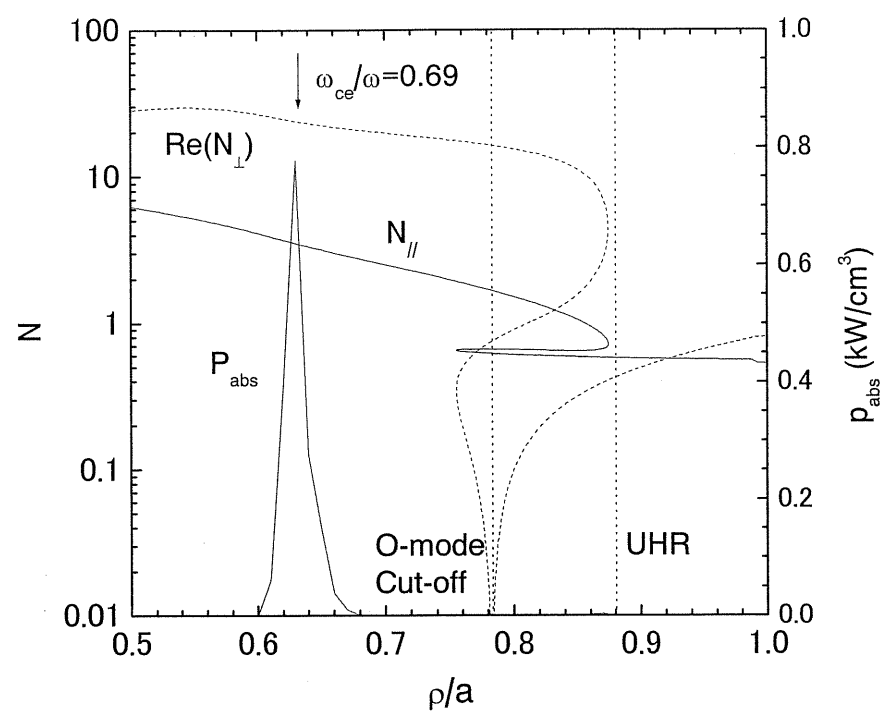


図 3.2 屈折率とパワー吸収分布

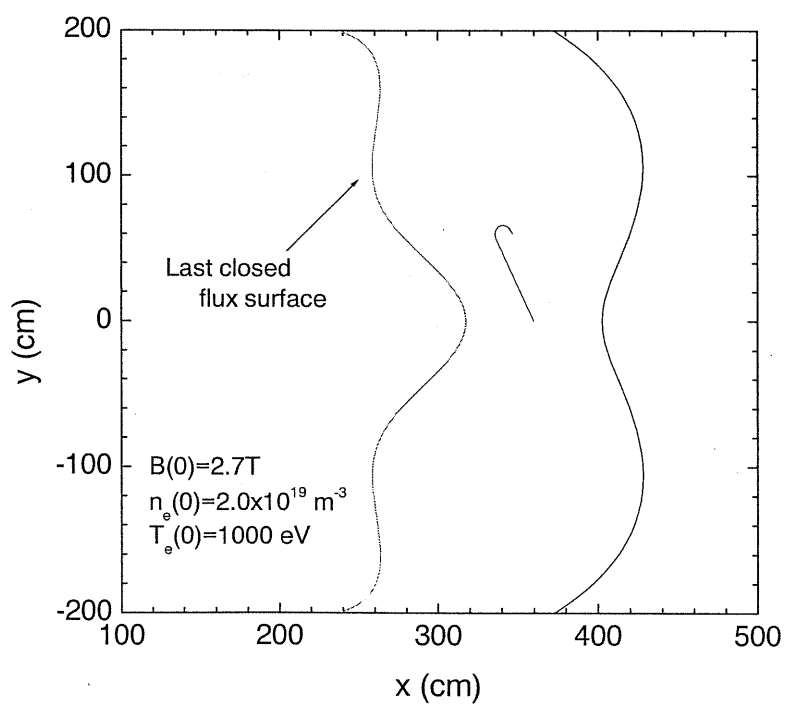
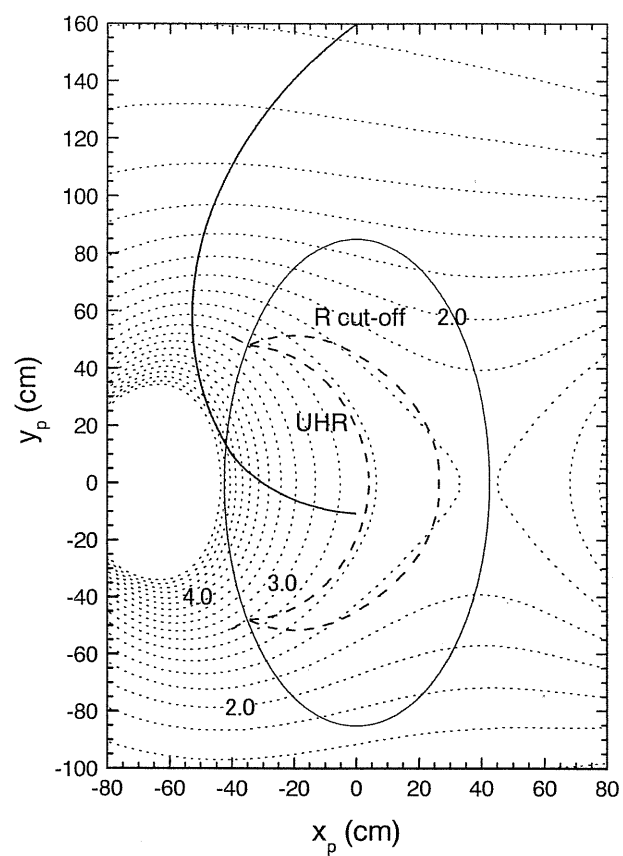


図 3.3. LHD 配位における X-B モード変換によるレイの軌跡、(a)ポロイダル断面投影図、(b)トロイダル断面図

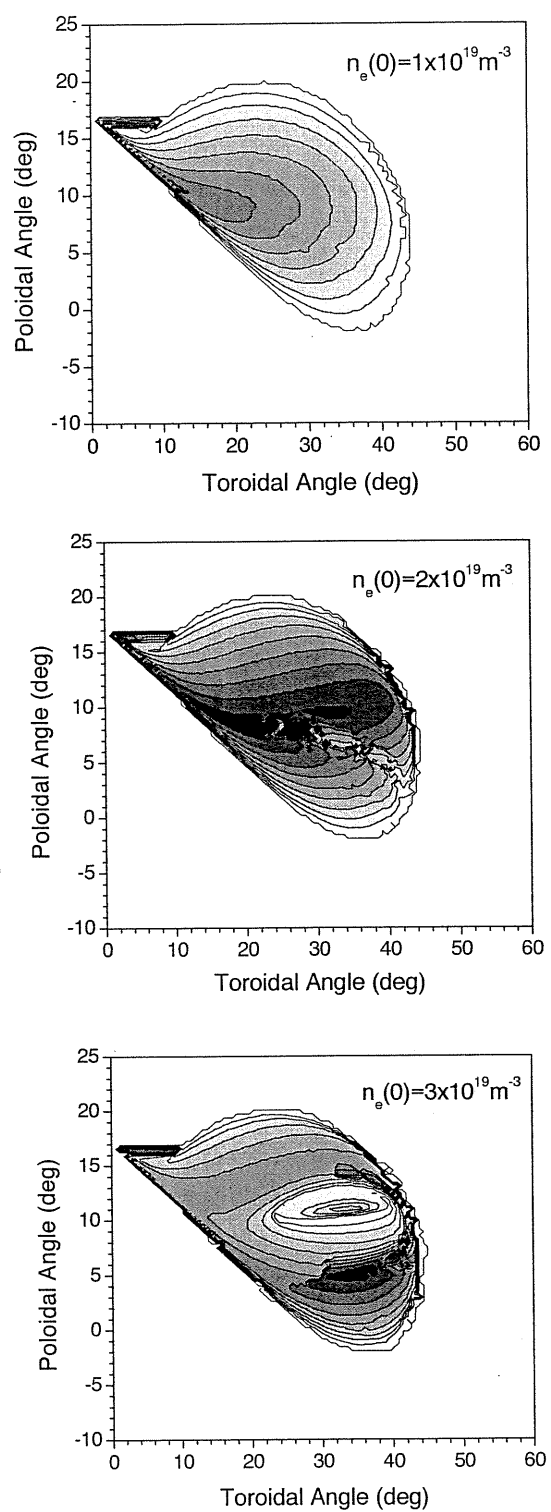


図 3.4 X-B モード変換加熱における入射角窓の密度依存性

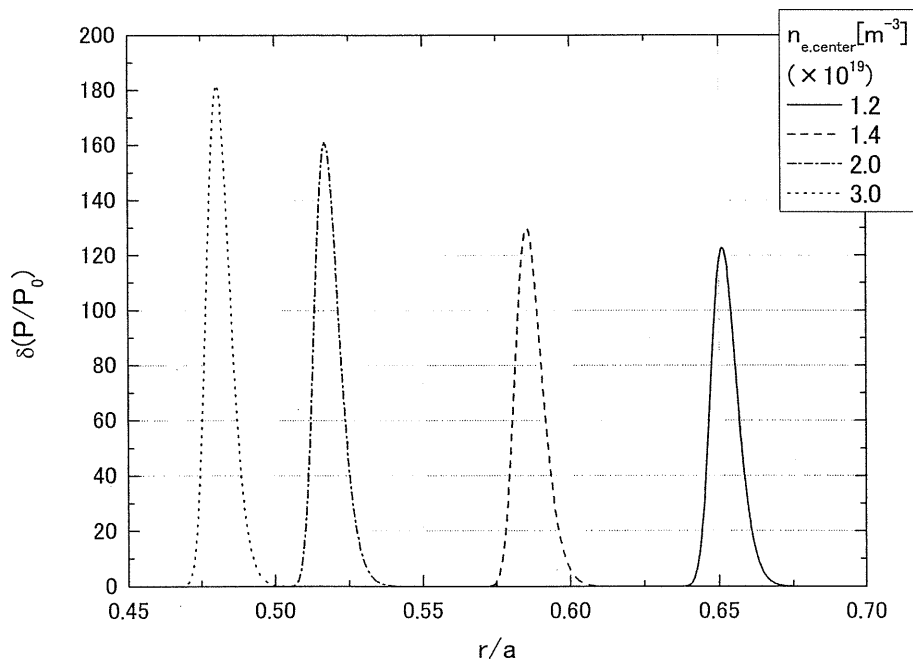
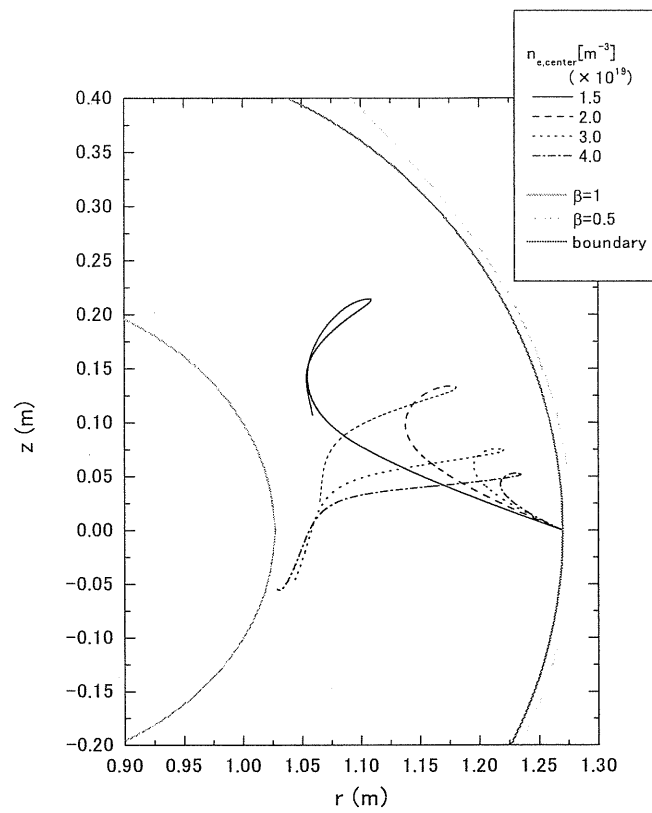


図 3.5 球状トーラスにおける 0-X-B モード変換のレイトレーシング計算、(a) レイの軌跡、(b) パワー吸収計算

4. EBW 実験結果

4.1 ヘリオトロン J における X-B 加熱実験

53.2 GHz ECH を用いたプラズマ実験をヘリオトロン J 装置において進めた。ヘリオトロン J はヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位であり、MHD 安定性と良好な粒子閉じ込めの両立を目指した準等磁場概念によって設計された装置である[9]。ヘリオトロン J の主なパラメタは、主半径 $R=1.2$ m、平均小半径 $a=0.1-0.2$ m で、低磁気シアの回転変換 $i/2\pi=0.3-0.8$ を有する。53.2 GHz ECH システムは、最大パワー400 kW、パルス幅 50 msec の高パワーミリ波をヘリオトロン J 真空容器中に入射する。入射モードは TE_{02} mode であるため、1 回通過吸収は高くなく、真空容器壁からの多重反射が重要な役割を果たす。

図 4.1 は 53.2 GHz ECH によって生成・加熱されたプラズマの時間発展である。平均電子密度は放射崩壊なしに $3.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ にまで到達した。この電子密度は第 2 高調波 X-mode のカットオフ密度 $1.75 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ よりも十分に高く、基本 O-mode のカットオフ密度 $3.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ をやや超えている。最大磁場強度においても 53.2 GHz ECH の第 2 高調波 X-mode 共鳴層は最外殻磁気面よりも外に位置し、基本波共鳴層は周辺領域 $r/a > 0.8$ に位置する。中心加熱の磁場強度依存性を調べるために磁場強度をスキャンした。図 4.2 は蓄積エネルギー W_p の磁場強度依存性を示している。第 2 高調波 X-mode の共鳴層が磁気軸中心に位置する場合に蓄積エネルギーのピークが見られるとともに、磁場強度が上がるにつれてもう一つのピークが現れる。このとき、第 2 高調波 X-mode 共鳴層は閉じ込め磁気面内には存在せず、また、基本波共鳴層も $r/a > 0.8$ にのみ位置する。磁場が $B=1.32$ T ($\omega_0/\omega = 0.69$) を超えると中心の電子温度が上昇し、分布はピークし始める。この実験では電子温度の絶対値を測定することはできなかったが、ECE 計測から評価されるパワー吸収分布及び ECE 信号減衰時間は ECH パワーが直接プラズマ中心領域に吸収される。粒子排出現象は第 2 高調波 ECH に比べ弱い。 H_α 強度の急激な増加は放電中発生せず、密度制御は比較的容易であった。

この加熱効果は通常電磁波共鳴では説明することはできず、X-B モード変換による EBW による加熱の可能性が高い。基本波共鳴層は磁場強度が 1.29 T より大きくなったとき最外殻磁気面内に存在する。壁からの反射によって生成された遅波 X-mode は基本波共鳴層を通過してプラズマ中に伝播してゆき、高域混成波共鳴層において EBW に変換される。モード変換のためのアクセス窓は、ヘリオトロン J の 3 次元磁場構造のためコーナー部の、あるトロイダル角に限られる。磁場の強い非一様性のため屈折率の平行成分 N_{\parallel} はトロイダル方向への伝播中に 1 よりも大きくなり、その結果、強いドップラーシフトした共鳴条件となる。

4.2 LHDP における X-B 加熱実験

84GHz ECH パワーを Ne ターゲットプラズマへと入射し、入射角や偏波面を制御し、34Hz の 100% パワー変調を行った。ターゲットプラズマは 82.7GHz ECH を用いて生成し、NBI で維持した。ECH パワーに変調をかけたとき、ECE 変調が検出されている。ミリ波を高磁場側から X-mode に結合するように入射した場合、ECR 層から低磁場側でピークした狭いパワー吸収分布が得られた。一方、O-mode を高磁場側から入射した場合、パワーの吸収が幾分か起きているが、吸収分布は ECR 層から高磁場側に位置し、また、X-mode 入射ほど狭いものとはならない。入射 X-mode が何らかの機構で O-mode へと変わり、O-mode の吸収が主たるものとなったためと考えられる。ミリ波を低磁場側から入射した場合、こうした狭いパワー吸収分布は X-mode、O-mode のどちらにおいても得ることができていない。これらの結果は、高磁場側入射により X-B モード変換加熱が行われていることを示している。

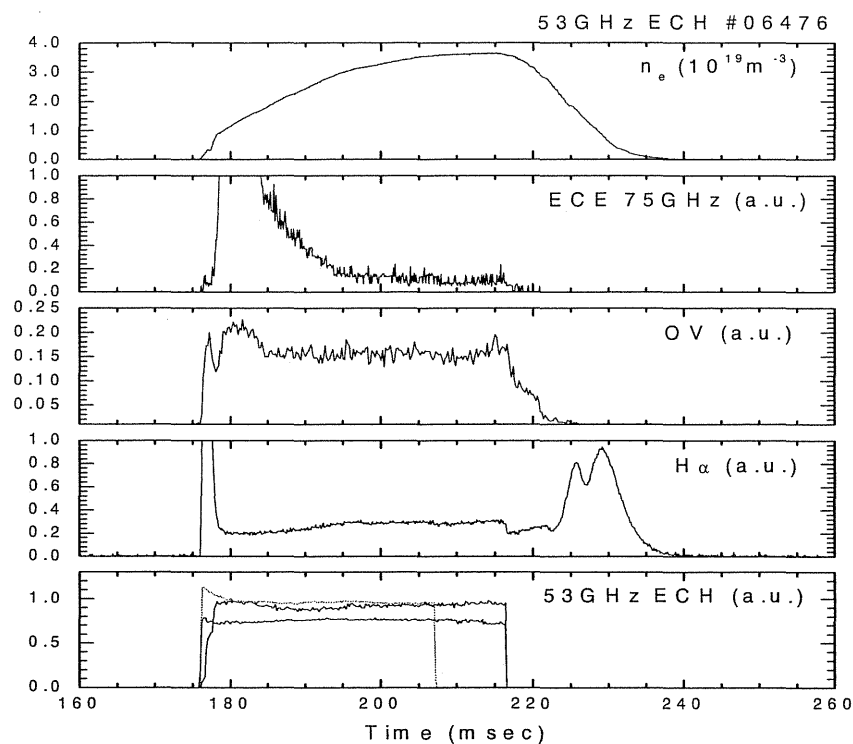


図 4.1 ヘリオトロン J における 53.2GHz ECH プラズマの時間発展

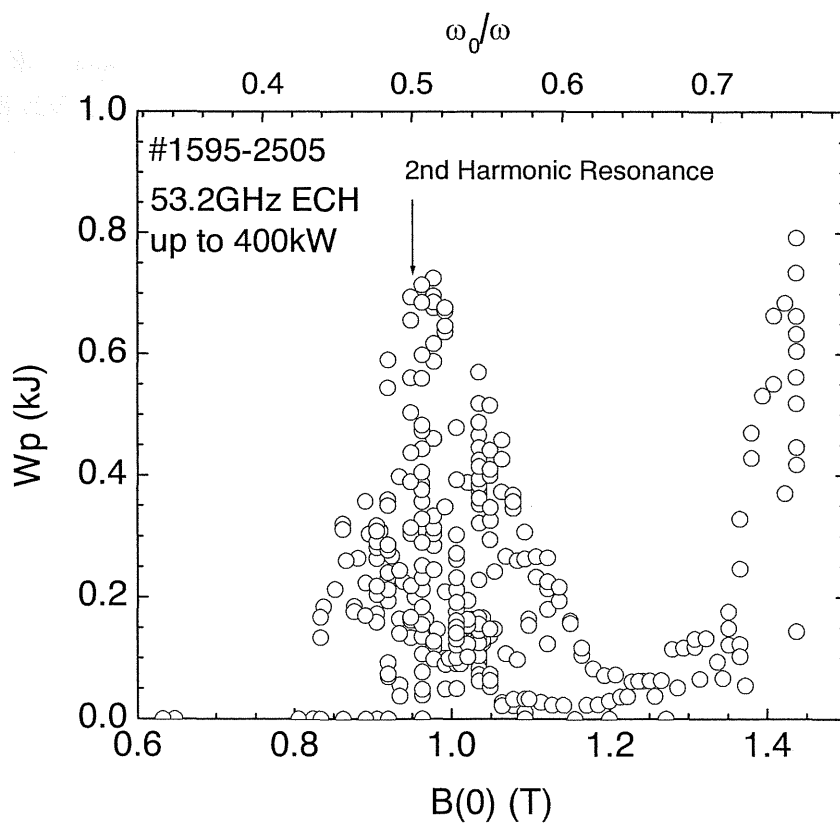


図 4.2 蓄積エネルギーの磁場強度依存性

結論

トーラス装置における電子バーンスタイン波 (EBW) を用いた電子加熱について理論及び実験の両側面から研究を行った。EBW はカットオフ密度を考慮することなく高密度領域におけるプラズマ中心加熱が可能であり、また、 N_{pe} が 1 よりも十分に大きいことから従来の電磁波による ECCD よりも数倍高い電流駆動効率を期待することができる。本研究では、高密度レイトレーシング計算コードの開発により、ヘリカル系配位と球状トーラス配位における、O-X-B 加熱と slow X-B 加熱の可能性について検討した。また、ヘリオトロン J 装置と LHD 装置において EBW 加熱について実験的に調べた。

理論では LHD などのヘリカル装置や低アスペクト比トカマクである球状トーラスの配位に対応したレイトレーシング計算コードを開発した。O-X-B 加熱では、O-X モード変換効率を向上させるために入射角と偏波面を注意深く制御する必要がある。パワー吸収分布のプラズマパラメタ依存性は弱く、実験において O-X-B 加熱を実証するのには好都合である。ヘリカル系では、遅波 X-B モード変換加熱は、その磁場形状から入射角をトロイダル方向に傾けることによって弱磁場側ポートからの入射によって可能である。入射角は低密度領域に比べてかなり広く、高密度プラズマを必要とする O-X-B 加熱よりも実験条件が緩和される。また、球状トカマク装置における O-X-B mode 変換を用いた EBW 加熱では、中心電子温度の変化による吸収位置の変化はほとんど見られず、温度による EBW 吸収の依存性は非常に小さい。また、トロイダル磁場の増加により吸収位置がプラズマの外方向にシフトするだけでなく、ドップラーシフトも変化する。中心電子密度が高くなればなるほど、サイクロトロン共鳴層近くで局所的な吸収が起こる。O-X mode 変換効率においては、トロイダル磁場の増加による効率の角度の広がりは見られず、最適入射角の変化は多少見られる。また、中心電子密度の変化により最適入射角度は変化するが高密度ほど角度の変化が見られなく、変換効率の広がりが大きくなる。中心電子密度が高いほど変換効率がよいこと、さらに EBW 吸収位置が共鳴層に近づくこと、そして吸収位置の温度による依存性が低いことから、球状トカマクにおいて、高密度プラズマの加熱に ECRH 装置による O-X-B 変換を用いた EBW 加熱が非常に有効であることを理論的に示した。

実験では、ヘリオトロン J や LHD において X-B モード変換による加熱が観測された。ヘリオトロン J での実験では、コアプラズマ領域に電磁波共鳴層が存在しない条件においても第 2 高調波 X-mode 加熱と同様の蓄積エネルギー 1 kJ を超えるプラズマを維持することができている。O-X-B モード変換を用いたカットオフ密度を超える EBW 加熱・電流駆動研究・実証は世界的にもまだ始まったばかりであるが、カットオフ密度が存在しないこと、吸収効率が高いことなどから、重要な課題となつてゆくであろう。特に、球状トーラスでの定常運転では通常の電流駆動法が利用できないため、EBW による電流駆動が重要な役割を占めることになる。

参考文献

- [1] A. Isayama, et al., Nucl. Fusion 43 (2003) 1272-1278
- [2] K. Nagasaki, et al., Nucl. Fusion 43 (2003) L7-L10
- [3] K. Nagasaki, et al., 20th IAEA Fusion Energy Conference, 2004
- [4] K. Nagasaki, et al., Fusion Technol. 32 (1997) 287-295
- [5] K. Nagasaki and N. Yanagi, Plasma Phys. Control. Fusion 44 (2002) 409
- [6] K. Nagasaki, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001) 617
- [7] K. Nagasaki, et al., Phys. Plasmas 6 (1999) 556
- [8] 寺岡裕喜、京都大学大学院エネルギー科学研究科修士論文(2000)
- [9] T. Obiki, et al., Nucl. Fusion 41 (2001) 833